

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.314.64

### 2.3. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ДВУНАПРАВЛЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### ENERGY-SAVING CONTROL OF BACK TO BACK CONVERTERS FOR POWERFUL AC ELECTRIC DRIVES

**Радионо́в Андрей Александрович**, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 82б - 21. E-mail: RadionovAA@rambler.ru, Тел.: +79049403456

**Маклаков Александр Сергеевич**, аспирант каф. «Мехатроники» Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Россия, 455051, г. Магнитогорск, ул. Жукова 6 - 323. E-mail: maklakov.work@gmail.com. Тел.: +79525229824

**Маклакова Екатерина Андреевна**, аспирант каф. «Мехатроники» Южно-Уральского государственного университета, Россия, 455051, г. Магнитогорск, ул. Юбилейная 133. E-mail: karyakina-katya@yandex.ru. Тел.: +79512447506

**Andrey A. Radionov**, Dr. Sc. (Techn.), full professor, advisor to the rector of South Ural state university (National Research), 454080, Chelyabinsk, 82b - 21, Lenin prospekt, Russia. E-mail: Radionov.mail@gmail.com, Ph.: +79049403456

**Alexander S. Maklakov**, postgraduate student of South Ural State University (National Research), 455051, Magnitogorsk, 6 - 323 Zhukov, Russia. E-mail: maklakov.work@gmail.com. Ph.: +79525229824

**Ekaterina A. Maklakova**, postgraduate student of South Ural State University (National Research), 455051, Magnitogorsk, 133 Jubileinaia, Russia. E-mail: karyakina-katya@yandex.ru. Ph.: +79512447506

**Аннотация:** Основная цель данной работы посвящена разработке нового энергосберегающего способа управления активным двунаправленным преобразователем частоты (АДПЧ) в составе мощных реверсивных электроприводов переменного тока (РЭПТ). Для достижения этой цели был проведен теоретический анализ возможного управления активной, реактивной и полной мощности в системе АДПЧ – питающая сеть. По результатам теоретических исследований были построены зависимости потоков мощности в системе АДПЧ – питающая сеть, на основе которых разработана новая система автоматического регулирования (САР) АДПЧ. Определено, что с помощью новой САР АДПЧ при питании РЭПТ можно компенсировать реактивную мощность и корректировать коэффициент мощности питающей сети. Это позволит снизить расход электроэнергии, стабилизировать напряжение и повысить пропускную способность сети.

**Abstract:** The main aim of the study is to develop a new energy-saving control method of a back to back converter (BtBC) in AC electric drive systems (EDSs). The research focus was concerned with the theoretical analysis of active, reactive and apparent power controlling in a system BtBC – grid. From the results obtained, the dependences of the power flows in the system BtBC – grid have been plotted. These dependences allow us to create a new closed loop system (CLS) of the BtBC. The principal conclusion from this work is that reactive power compensation and power factor correction by the new CLS of the BtBC supplying ac EDSs is determined. It can reduce a share of the consumption reactive power from a substation and improve the power quality.

**Ключевые слова:** электропривод переменного тока; активный двунаправленный преобразователь частоты; компенсация реактивной мощности; корректировка коэффициента мощности.

**Key words:** alternation current electric drive; back to back converter; reactive power compensation; power factor correction.

#### ВВЕДЕНИЕ

Оптимальное использование электроэнергии технологическими объектами является одним из

приоритетных направлений в развитии промышленных предприятий. Различные технологии энергосбережения активно развиваются в связи с повышением цен на

электроэнергию и растущему спросу на углеводородное сырье. Снижение себестоимости продукции и повышение экологической безопасности являются одним из основных показателей развития современного предприятия [1]. Последние тенденции в коммерческих отношениях предприятий с энергосистемой показывают, что на потребителя электрической энергии начинают возлагаться достаточно высокие требования и обязанности. В частности, введены нормативные значения коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}\varphi = 0,4$  для внутривоздушных сетей напряжением 6-20 кВ и  $\text{tg}\varphi = 0,35$  для напряжения 0,4 кВ [2]. Кроме того, для стимулирования выполнения данных требований разрабатывают новые методики расчета повышающих или понижающих коэффициентов на потребляемую электроэнергию. Эти методики позволяют потребителю получить скидку на электроэнергию при участии в регулировании коэффициента реактивной мощности сети. Следовательно, компенсация реактивной мощности или повышение коэффициента мощности приобретает особую экономическую значимость для предприятий [3].

#### ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ РАБОТЫ

Массовое внедрение в производство получили активные двунаправленные преобразователи частоты (АДПЧ) для питания мощных реверсивных электроприводов переменного тока (РЭПТ). Такие преобразователи имеют возможность работать с отстающим, опережающим и единичным коэффициентом мощности. Исследования АДПЧ отражены в различных трудах отечественных и зарубежных ученых. Однако следует отметить, что уровень теоретических и прикладных исследований электромагнитных процессов для АДПЧ при новейших алгоритмах коммутации полупроводниковых ключей и при режимах корректировки коэффициента мощности в питающей сети недостаточно рассмотрен в отечественной и зарубежной литературе. Исходя из выше сказанного, целью данной работы является разработка и исследование нового энергосберегающего способа управления АДПЧ в составе РЭПТ. Для достижения этой цели будет проведен теоретический анализ возможного управления активной, реактивной и полной мощности в системе АДПЧ – питающая сеть.

#### СИСТЕМА АДПЧ – ПИТАЮЩАЯ СЕТЬ

АДПЧ представляет собой два управляемых источника напряжения с общим звеном постоянного тока (DC). Один источник присоединяется к сети переменного тока – активный выпрямитель напряжения (АВН), а другой к нагрузке – автономный инвертор

напряжения (АИН) [4-7]. В большинстве случаев для питания РЭПТ с номинальной мощностью выше 1 МВт АДПЧ выполняются по трехуровневой топологии с разделительными диодами. Для АВН применяют современные алгоритмы коммутации полупроводниковых ключей с удалением выделенных гармоник или с минимизацией суммарного показателя гармонического искажения (THD) [8]. Для большинства АИН применяют алгоритмы на базе пространственно-векторных технологий [9, 10]. На рис. 1 представлена принципиальная схема АДПЧ.

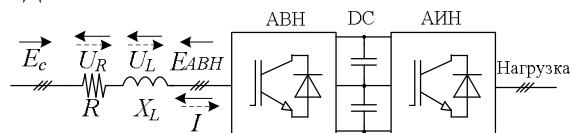


Рис. 1. Принципиальная схема АДПЧ

Принцип действия АДПЧ удобно рассмотреть с помощью однофазной схемы замещения на рис. 2, в которой он представлен в виде источника ЭДС  $E_{ABH}$ , подключенного через реактор с эквивалентным индуктивным сопротивлением  $X_L$  и эквивалентным активным сопротивлением  $R$  к питающей сети с ЭДС  $E_c$ . Разность ЭДС  $E_{ABH}$  и  $E_c$  приходится на  $X_L$  и  $R$  падения напряжения на которых  $U_L$  и  $U_R$  соответственно [11].

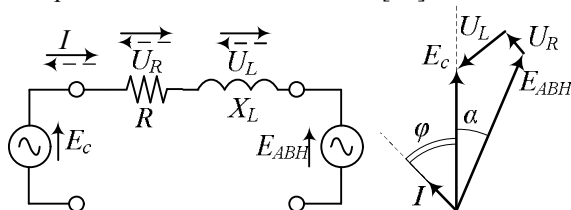


Рис. 2. Схема замещения АДПЧ в точке подключения к питающей сети.

Потребляемая мощность относительно сети определяется следующими выражениями [19]:

$$P_c = \frac{E_c E_{ABH} (R \cos(\alpha) + X_L \sin(\alpha)) - E_c^2 R}{R^2 + X_L^2}, \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{E_c E_{ABH} (X_L \cos(\alpha) - R \sin(\alpha)) - E_c^2 X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{\frac{E_c^2 (E_{ABH}^2 - 2 E_{ABH} E_c \cos(\alpha) + E_c^2)}{R^2 + X_L^2}}, \quad (3)$$

$$E_{ABH} = m \cdot U_{dc} \cdot K_{ШИМ}. \quad (4)$$

где,  $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ ,  $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ ,  $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$  – зависимости активной, реактивной и полной мощности в системе АДПЧ – питающая сеть;  $K_{ABH}$  – коэффициент ШИМ;  $U_{dc}$  – напряжение DC,  $m$  – коэффициент модуляции.

С помощью зависимостей (1), (2), (3) и (4) мы сможем рассчитать максимальную потребляемую

или инвертируемую мощность в системе АДПЧ – питающая сеть. Следует отметить, что максимальный и минимальный угол  $\alpha$  и выходное напряжение  $E_{ABH}$  могут различаться в зависимости от силовой схемы, режимов работы РЭПТ и технических данных АДПЧ. В большинстве случаев у серийно-выпускаемых АДПЧ при питании РЭПТ в рабочих режимах угол  $\alpha$  может находиться в диапазоне от  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$ , а гладкая составляющая выходного линейного напряжения  $E_{ABH}$  может находиться в диапазоне от 80% до 140% от номинального линейного напряжения сети. На рис. 3 а, б построены графики зависимостей (1), (2) и (3) в системе АДПЧ – питающая сеть.

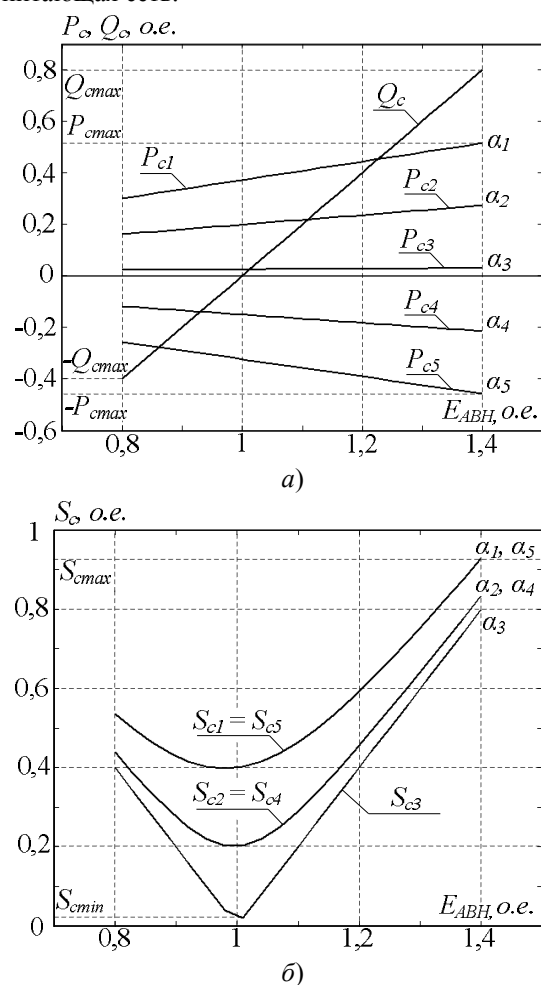


Рис. 3. Зависимости активной  $P_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ , реактивной  $Q_c = f(E_{ABH}, \alpha)$  (а) и полной  $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$  (б) мощности при заданных углах  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\alpha_2 = 5^\circ$ ,  $\alpha_3 = 0^\circ$ ,  $\alpha_4 = -5^\circ$ ,  $\alpha_5 = -10^\circ$  и напряжениях  $E_{ABH}$  в диапазоне от 0,8 до 1,4 о.е.

Анализ зависимостей на рис. 3 показал, что максимумы для активной  $P_{c1-5}$ , реактивной  $Q_c$  и полной  $S_{c1-5}$  мощности при различных углах  $\alpha_{1-5}$  достигаются при максимальном напряжении  $E_{ABH} = 1,4$  о.е. Следовательно, можно сделать вывод,

что при повышении уровня напряжения в ДС диапазон передаваемой мощности в системе АДПЧ – питающая сеть увеличивается. Из уравнения (2) следует, что реактивная мощность  $Q_c \approx const$  при различных углах  $\alpha_{1-5}$  (рис. 3, а), т.к. при малых углах  $\cos(\alpha) \approx 1$ . Для разработки нового энергосберегающего метода управления АДПЧ особую значимость приобретает зависимость  $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ , которая для определенных углов  $\alpha_{1-5}$  показана на рис. 3, б. Используя эту зависимость (рис. 3, б) можно построить систему управления АДПЧ таким образом, чтобы при определённых значениях  $\alpha$  и  $E_{ABH}$  обеспечивалось постоянство максимальной потребляемой полной мощности из питающей сети  $S_{cmax} = f(E_{ABH}, \alpha) = const$ . В этом случае необходимо обеспечить требуемую активную мощность для питания РЭПТ, а для расчета величины дополнительно передаваемой реактивной мощности в системе АДПЧ – питающая сеть использовать зависимость  $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$ , которая показана на рис. 4. Ограничение по передаваемой максимальной мощности должно рассчитываться с помощью системы управления (СУ) АВН на основе следующего уравнения:

$$Q_{clim} = \sqrt{S_{cmax}^2 - P_c^2} \quad (5)$$

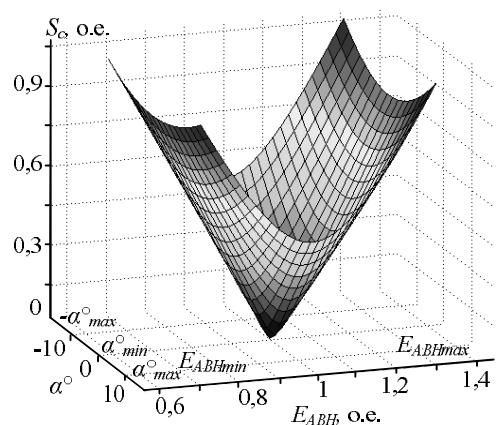


Рис. 4. График зависимости полной мощности  $S_c = f(E_{ABH}, \alpha)$  в системе АДПЧ – питающая сеть

#### НОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВН

За основу построения новой СУ АВН была принята классическая структура с прямой ориентацией по вектору питающего напряжения, которая подробно рассмотрена в трудах [12-14]. В СУ для регулирования вектора тока используются двумерный пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор по осям  $dq$ , и для регулирования напряжения в ДС используется ПИ регулятор. На рис. 5 показана функциональная схема САУ АВН.

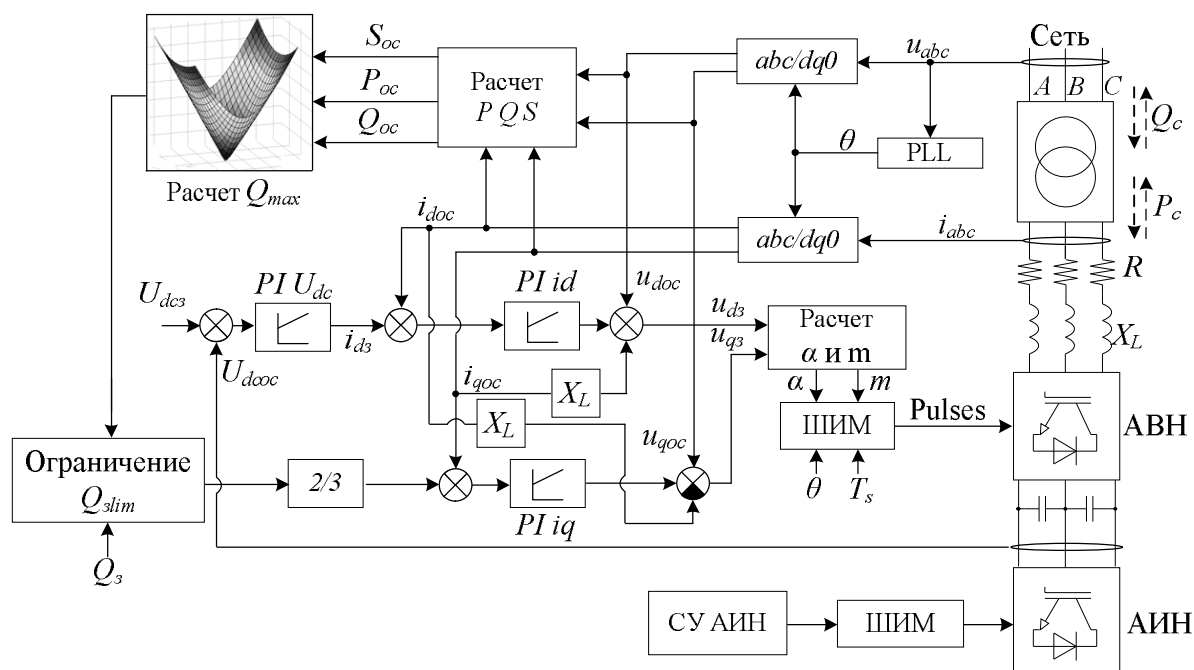


Рис. 5. Функциональная схема АДПЧ с энергосберегающей СУ АВН

На рис. 5 приняты следующие обозначения:  $X_L$ ,  $R$  – эквивалентное индуктивное и активное сопротивление в точке подключения АДПЧ к сети переменного тока;  $T_s$  – период квантования ШИМ;  $m$  – коэффициент модуляции АВН;  $\alpha$  – угол сдвига;  $u_{abc}$  – напряжения сети;  $i_{abc}$  – токи сети;  $\theta$  – угол поворота вектора напряжений сети в системе  $dq$ ;  $i_{d3}$  и  $i_{d0c}$  – заданный и реальный ток по оси  $d$ ;  $i_{q3}$  и  $i_{q0c}$  – заданный и реальный ток по оси  $q$ ;  $U_{dc\max}$  и  $U_{dc0c}$  – заданное и реальное напряжение DC;  $P_{oc}$ ,  $Q_{oc}$  и  $S_{oc}$  – измеренная активная, реактивная и полная мощность;  $Q_{slim}$  – рассчитанное ограничение по реактивной мощности;  $Q_3$  – заданная реактивная мощность; PLL – устройство фазовой автоподстройки частоты.

Авторами предлагается использовать СУ АВН на рис. 5., когда рядом с точкой подключения АДПЧ к питающей сети параллельно работают потребители реактивной мощности. Перспективен такой способ управления совместно с технологией интеллектуальной промышленной сети (Industrial Smart Grid). Industrial Smart Grid может осуществлять на верхнем уровне управления мониторинг в реальном времени коэффициента мощности сети  $\cos(\varphi)_c$  и формировать на локальном уровне управления АДПЧ задание на генерацию или потребление реактивной мощности  $Q_3$ . Это позволит корректировать коэффициент мощности в точке подключений к питающей сети [15]. Когда на подстанции будет перекомпенсация или недокомпенсация реактивной мощности, то РЭПТ при питании от АДПЧ сможет сгенерировать или потребить некоторую величину реактивной мощности, тем самым улучшив коэффициент мощности в точке подключения [16]. На рис. 6 показан в упрощенном виде

принцип корректировки коэффициента мощности сети посредством энергосберегающей СУ АДПЧ для интеллектуальной системы электроснабжения предприятия.

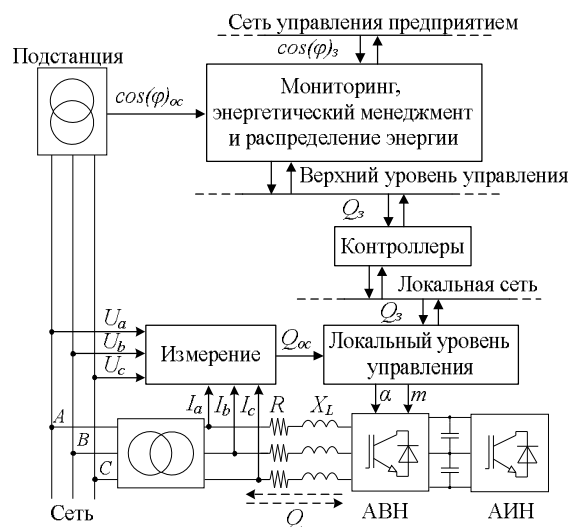


Рис. 6. Функциональная схема интеллектуальной промышленной сети

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам теоретических исследований были построены зависимости потоков мощности в системе АДПЧ – питающая сеть, на основе которых разработана новая энергосберегающая система автоматического регулирования (САР) АДПЧ. Определено, что с помощью новой САР АДПЧ при питании РЭПТ можно компенсировать реактивную мощность и корректировать коэффициент мощности питающей сети. Это

позволит снизить расход электроэнергии, стабилизировать напряжение и повысить пропускную способность сети. Величину потребляемой или генерируемой реактивной мощности РЭПТ необходимо рассчитывать в соответствии с нагрузочной диаграммой привода. Наиболее актуально использовать данный метод управления, когда рядом с точкой подключения электропривода к питающей сети параллельно работают установки с нелинейной нагрузкой, т.е. потребители реактивной мощности. Особенно перспективно такой способ управления использовать совместно с технологией промышленной Industrial Smart Grid.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.
2. Приказ № 49 от 22.02.2007 г. Министерства промышленности и энергетики РФ «О порядке расчёта значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, принимаемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения)»
3. Маклаков А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения / А.С. Маклаков, В.Р. Гасияров, А.В. Белый // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Вып.1. – №1. – С. 23-30.
4. Храмшин Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станков / Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 48-52.
5. Маклаков А.С. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 40-47.
6. Храмшин Т.Р. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станков / Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Вып.1. – №1. – С. 3-7.
7. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2010. – 654 с.
8. Крубцов Д.С. Способы управления активными выпрямителями главных электроприводов прокатных станков / Д.С. Крубцов, Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова. – 2013. – Т. 2. – №71. – С. 3-6.
9. Храмшин Т.Р. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМа / Т.Р. Храмшин, И.Р. Абдулвелеев, Г.П. Корнилов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Вып. 2. – №1. – С. 38-46.
10. Храмшин Т.Р. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения / Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Вып. 2. – №4. – С. 7-13.
11. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учеб. пособие. / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.А. Мурзинов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова. 2012. 235 с.
12. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистного стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – №3. – С. 16-25.
13. Радионов А.А. О возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством электропривода на базе АС-DC-АС преобразователя / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – №2. – С. 78-83.
14. Маклаков А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 43-50.
15. Маклаков А.С. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Вып.2. – №1. – С. 30-37.
16. Радионов, А.А. Использование мощных электроприводов на базе активных двунаправленных преобразователей в составе промышленной Smart Grid системы / А.А. Радионов, А.С. Маклаков, А.Д. Чернышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 74–81. DOI: 10.14529/power150109

